

УДК 681.511.22, 535.66

Улучшенная технология мультиспектральной съёмки с применением многоканального светодиодного кластера

Арапов С. Ю. *, Дубинин И. С., Арапова С. П., Мезенцева С. Г.

*Уральский федеральный университет,
ул. Мира, 32, Р041, Екатеринбург, Россия, 620002*

Аннотация. Неравномерное освещение является одним из основных факторов, ведущих к потере точности восстановления спектрального коэффициента отражения по данным мультиспектральной съёмки. При использовании светодиодов эта проблема усугубляется точечным характером пространственно-разнесённых излучателей. В статье рассматривается улучшение светодиодной мультиспектральной съёмочной установки и процесса обработки полученных изображений. Точность результатов существенно улучшена по сравнению с предшествующими работами.

Ключевые слова: светодиод, мультиспектральное изображение, спектр отражения, цветовое отличие.

Improved technology of multispectral imaging with multichannel LED cluster

Arapov S. Yu. *, Dubinin I. S., Arapova S. P., Mezentseva S. G.

Ural Federal University, Mira, 32, R041, Ekaterinburg, Russia, 620002

Abstract. Non-uniformity lighting is one of the main factors leading to the loss reconstruction accuracy of the spectral reflectance according to multispectral photography. When using LEDs, this problem is compounded by the spatial-spaced point emitters. The article deals with the improvement of led multispectral imaging stand and processing of the obtained images. The accuracy of the results significantly improved compared to previous works.

Keywords: LED, multispectral image, reflectance spectra, color difference.

Введение

Системы мультиспектральной съёмки (МСС) на основе светоизлучающих диодов (СИД) обладают рядом преимуществ. Освещение снимаемых объектов СИД легко управляется электронными средствами. Это позволяет отказаться от механических систем смены фильтров и даёт дополнительные возможности управления экспозицией. Для стандартных трихроматических камер [1] возможно ускорение съёмочного процесса, основанное на сочетании спектральных характеристик фильтров сенсора и СИД. Это позволяет получать из каждого отснятого кадра сразу три слоя мультиспектрального изображения (МСИ). Системы МСС на основе СИД теоретически могут конкурировать по спектральному разрешению с традиционными конструкциями на интерференционных фильтрах. Следует добавить, что наиболее распространённый в повседневной полиграфической практике спектрофотометр i1Pro (XRite), так же обладает невысоким физическим спектральным разрешением (10 нм), хотя при этом существенно превосходит мультиспектральные системы по количеству спектральных отсчётов.

В то же время для систем МСС на основе СИД имеются ограничения. Необходимость полной изоляции от внешнего освещения во время экспозиции ограничивает размеры снимаемых объектов и исключает съёмку вне помещений. Дополнительные сложности связаны с требованием достижения равномерной освещённости снимаемой поверхности [1, 2]. Вопросы улучшения точности реконструкции спектров по данным МСС на основе СИД во многом схожи с аналогичными при использовании узкозональных фильтрующих элементов [3, 4]. В работе [4] показано, что несмотря на теоретически больший по сравнению широкополосными системами потенциал, узкополосные системы МСС не всегда дают лучшую точность реконструкции спектров.

В работе [5] описан эксперимент по МСС шкал профилирования печатного процесса с применением мультиспектрального светодиодного кластера (МСК). Низкая точность полученных результатов послужила поводом к повторному анализу экспериментальных данных, в результате которого было установлено, что основным фактором снижения точности является неравномерность распределения освещённости по полю кадра. Таким образом целью данной работы является аппаратное и технологическое улучшение эксперимента, описанного в работе [5], направленное на устранение этого недостатка.

1. Модернизация экспериментального оборудования

Как и в [5] основной элемент фотосъёмочной установки — автоматизированный МСК с девятью независимыми спектральными каналами. Спектральные характеристики МСК и его возможности обсуждались в работе [6]. Съёмка производится закреплённой на независимом штативе цифровой фотокамерой (ЦФК)

SonyNEX-5N с объективом SEL-50F18 (50 мм F 1,8). Для данной камеры известны спектральные характеристики сенсора, и она хорошо зарекомендовала себя в предыдущих исследованиях [7–9]. Внешний вид модернизированной мультиспектральной фотосъёмочной установки представлен на рис. 1.

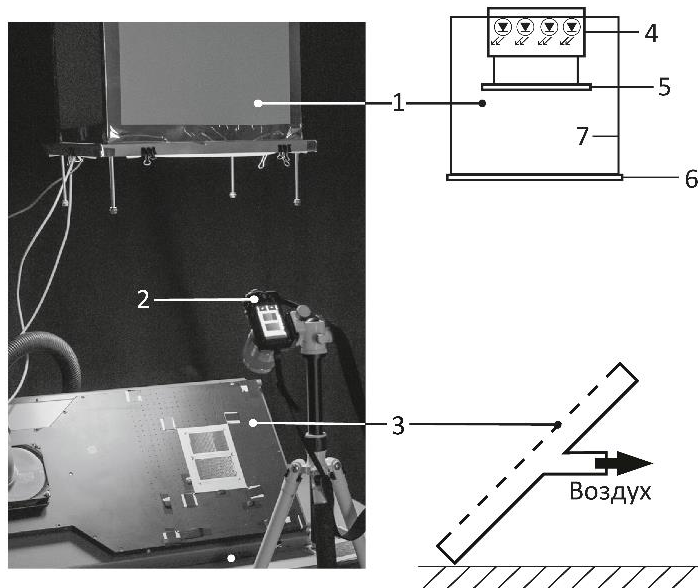


Рис. 1. Система мультиспектральной съёмки 1 — МСК, 2 — ЦФК с держателем светофильтров, 3 — вакуумный стол с тестовой шкалой (ТШ), 4 — светодиодный излучатель, 5, 6 — рассеиватели из пористого полиэтилена, 7 — внутренняя зеркальная поверхность алюминиевого отражателя

Улучшение равномерности освещения оттисков достигнуто установкой на МСК нового отражателя из алюминия (7 на рис. 1) и двух рассеивателей из пористого полиэтилена (5, 6 на рис. 1). Такой выбор материалов позволяет использовать в составе МСК ультрафиолетовые СИД. Другим улучшением эксперимента стала замена подставки для тестовых шкал (ТШ) на вакуумный стол, устраняющий волны и заломы на поверхности оттисков и обеспечивающий лучшую фиксацию. В остальном аппаратная часть эксперимента осталась такой же как в работе [5].

Съёмка производится по нормали, а освещение — под углом 45° к поверхности вакуумного стола. Ход лучей в эксперименте приближен к стандартной геометрии $45^\circ/0$, рекомендованной для спектральных измерений в полиграфии. Спектральные измерения использующихся в работе шкал и освещения производятся спектрофотометром i1Pro в комплексе с открытым программным обеспечением Argyll CMS. Такое сочетание даёт возможность регистрации спектров в интервале 370–730 нм, в том числе в режиме «высокого разрешения» с шагом дискре-

тизации по длине волны 3,33 нм. Это приближается к рекомендациям международной комиссии по освещению (МКО) при работе со спектрами СИД. В то же время, спектральные характеристики имеющейся ЦФК известны с шагом в 10 нм и такая же дискретизация принята в полиграфии для измерения спектров отражения, поэтому режим «высокого разрешения» не используется.

Всего в данной работе рассматривается 29 спектральных зон в интервале 400–680 нм, поскольку за пределами указанного интервала чувствительность ЦФК близка к нулю. В результате в МСК не используется один ультрафиолетовый спектральный канал. Итоговые спектральные характеристики фотосъёмочной установки представлены на рис. 2.

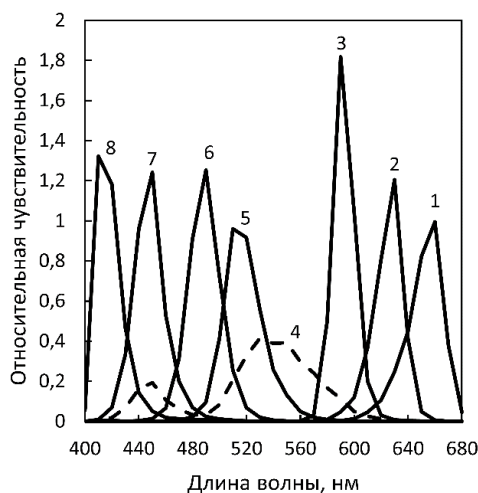


Рис. 2. Спектральные характеристики виртуальных сенсоров фотосъёмочной установки. Сенсоры 1–8 пронумерованы начиная с длинноволновых

Объектами эксперимента являются — стандартная тестовая шкала ColorChecker® (CCh), состоящая из 24 полей, тестовая шкала (ТШ) профилирования процесса печати из работы [8] (1944 поля, формат А6), и чистый лист бумаги (формат А6) для фоторегистрации распределения освещённости. В процессе МСС объекты поочерёдно фиксируются на поверхности вакуумного стола, расположенной перпендикулярно оптической оси объектива камеры. Все настройки камеры переводятся в ручной режим, чтобы избежать неконтролируемого вмешательства автоматики, после чего производится настройка экспозиции с целью устранения превышения динамического диапазона сенсора.

2. Улучшение технологии эксперимента

Устранение неравномерности освещения только лишь за счёт аппаратной модернизации в описанной системе МСС невозможно, требуется внесение измене-

ний в съёмочный процесс и в обработку результатов. Соответствующая коррекция тоновых значений в произвольном пикселе МСИ может быть осуществлена умножением на индивидуальный поправочный коэффициент, вычисление которого требует знания тоновых значений «чёрного» и «опорного белого». Уровень «чёрного» считается одинаковым для всех пикселей и определяется по кадру, сделанному с закрытой крышкой объектива, после настройки камеры. Значение уровня «опорного белого» для каждой точки изображения рассчитывается по результатам МСС незапечатанного листа бумаги, аналогичного с ТШ формата.

В остальном технология эксперимента совпадает с описанной в [5]. Яркость каналов МСК заранее оптимизируется для наилучшего использования динамического диапазона ЦФК при съёмке с постоянной выдержкой. Перед съёмкой на место шкалы помещается спектрофотометр и производится цикл переключения каналов МСК с замером спектральной облучённости. Далее для каждого из трёх экспериментальных объектов — незапечатанный лист, ССh, ТШ — повторяется одинаковый съёмочный процесс. Он заключается в последовательном переключении каналов МСК, и съёмки объекта с записью в формате RAW.

Обработка RAW файлов осуществляется в пакетном режиме (с помощью бат-файла) утилитой 4channels из открытого пакета программ LibRAW:

```
4channels -B <имяфайла>.arw,
```

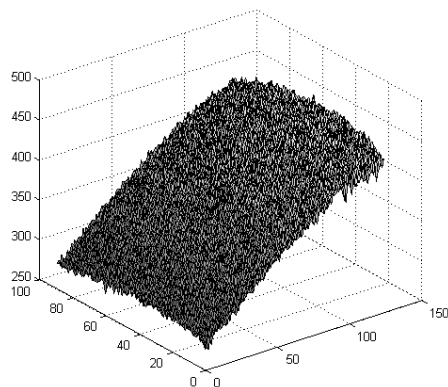
где ключ -B означает отключение вычитания уровня чёрного. Из полученных таким образом tiff-файлов, соответствующих группам байеровских пикселей R, G1, G2, B, отбираются необходимые, и объединяются в МСИ. Совмещение слоёв производится по изображениям специальных контрастных элементов, закреплённых на вакуумном столе.

Следующий этап обработки — построение профиля освещённости в поле кадра по МСИ незапечатанного листа бумаги. На рис. 3, а представлено распределение тоновых значений в одном из слоёв МСИ, соответствующее формату А6. Очевидно, что учёт локальной освещённости необходим, поскольку в пределах поля кадра её изменения могут достигать полутора раз. Простейший способ коррекции — деление тоновых значений пикселей МСИ на тоновые значения «опорного белого» из аналогичных пикселей МСИ незапечатанной бумаги. Таким образом тоновые значения приблизительно (из-за наличия шумов) приводятся к интервалу от нуля до единицы. Однако, такая процедура допустима только после сглаживания шумов, которые хорошо видны на рис. 3, а.

В данной работе сглаженные тоновые значения определялись путём линейной интерполяции на основе сетки опорных значений (рис. 3, б), которые получались усреднением по окрестностям выбранных точек размером 21 на 21 пиксель.

После устранения искажений, вызванных неравномерным освещением, следует сопоставление экспериментальных тоновых значений с расчётно-теоретическими для полей калибровочной шкалы на калибровочной диаграмме. Это процедура продлевается для каждого сенсора (слоя МСИ). Кроме получения коэффициентов, связывающих расчётные фотометрические значения с тоновыми значениями пикселей МСИ, калибровочная диаграмма позволяет оценить «качество» полученной системы, её линейность, наличие шумов и искажений.

а)



б)

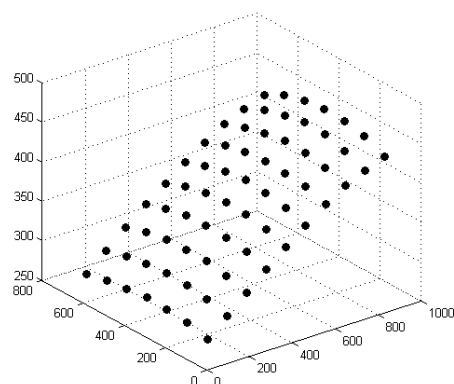


Рис. 3. Распределение освещённости по площади кадра: а) тоновые значения в одном из слоёв МСИ (на график выведен каждый седьмой пиксель); б) сетка опорных значений освещённости для линейной интерполяции

На рис. 4, а приведён пример калибровочной диаграммы для трёх сенсоров, полученной в настоящей работе. Построение калибровочных прямых для всех сенсоров производилось по шести нейтральным полям (с 19-го по 24-е) шкалы ССh. Там же, на рис. 4, б для сравнения приведены калибровочные данные предшествовавшей работы [5], которые строились по всем 24-м полям ССh. Из сопоставления диаграмм видны различия технологий. В новом улучшенном варианте тоновые значения приблизительно приведены к интервалу от нуля до единицы, уровень чёрного исключён из тоновых значений ещё на этапе коррекции. В результате внесённых улучшений калибровочные зависимости стали существенно ближе к линейным.

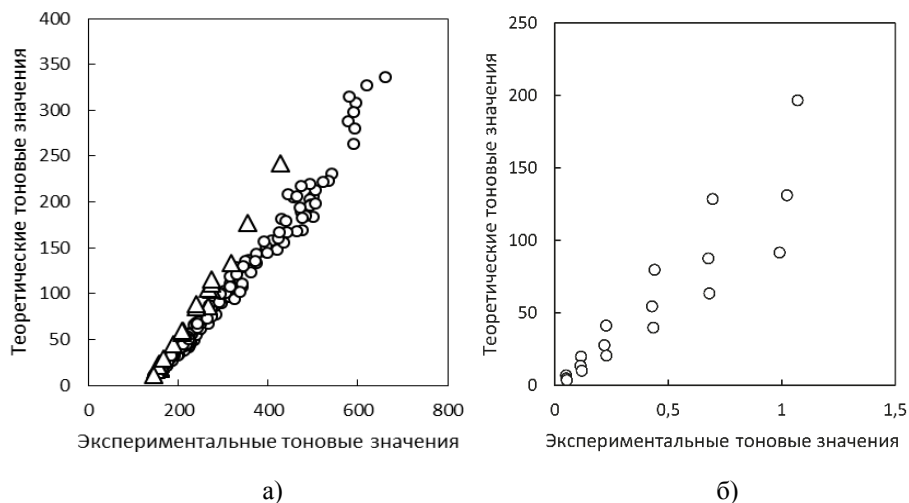


Рис. 4. Пример распределения тоновых значений по площади кадра: а) до выравнивания; б) после выравнивания

Дальнейшая обработка экспериментальных данных производится стандартным образом, аналогично изложенному в работе [8]. После калибровки становится возможным определение конвертирующей матрицы и реконструкция спектров отражения. Реконструированные спектры позволяют рассчитать цветовые координаты полей и проанализировать погрешность их определения по отношению к контрольным значениям.

3. Полученные результаты

Реконструкция спектров отражения в данной работе имеет особенность, которая заключается в отсутствии традиционной избыточности экспериментальных данных. В процессе эксперимента использовалось всего восемь виртуальных сенсоров и такое же количество базисных функций для аппроксимации спектров отражения. Формально, это обстоятельство никак не препятствует использованию расчётных формул, хорошо зарекомендовавших себя в работах [7, 8, 10], однако к полученным результатам всё же следует относиться как к предварительным. Тем не менее, они позволяют решить основную задачу, поставленную перед данной работой, заключающуюся в оценке эффективности модернизации эксперимента. На рис. 5, в качестве примера, приведены реконструированные спектры нейтральных серых и основных хроматических полей шкалы CCh (с 14-го поля по 24-е). Там же для сравнения представлены аналогичные результаты предыдущего исследования [5].

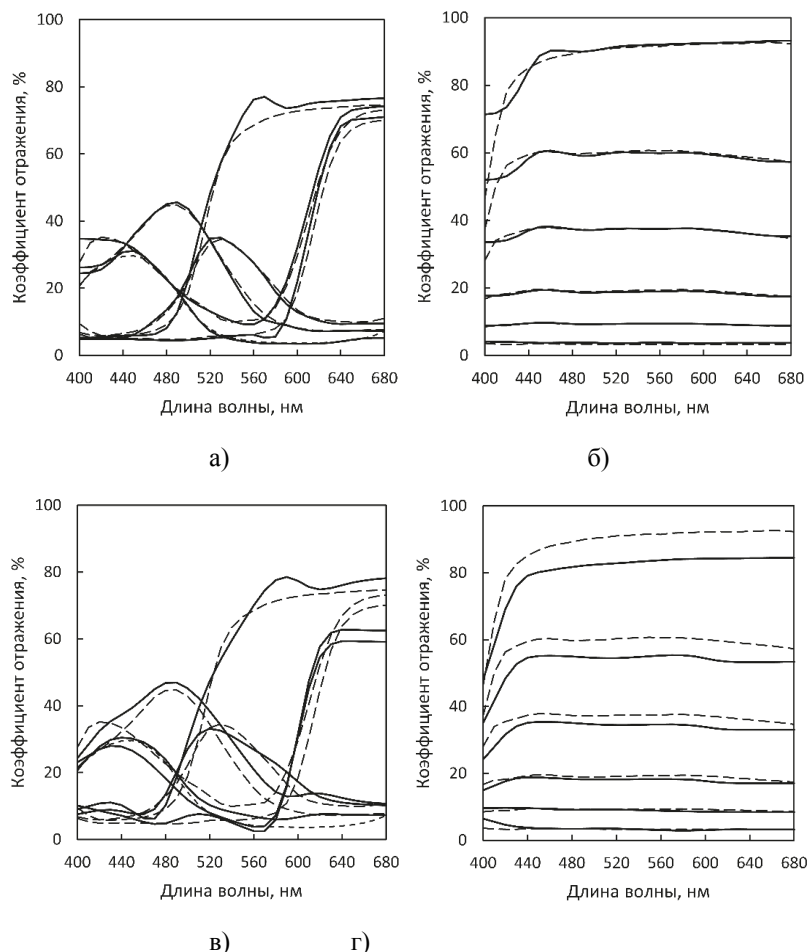


Рис. 5. Пример реконструкции спектров отражения полей шкалы ColorChecker: а), б) — результаты данной работы, в), г) — результаты из предыдущей работы. Пунктиром обозначены контрольные спектры, измеренные спектрофотометром, числами на графиках указаны номера полей

Наблюдаемые различия в результатах реконструкции связаны не только с описанной модернизацией, но и с применением в [5] модифицированного набора базисных функций, сокращённого до шести элементов. В целом, формы реконструированных спектральных кривых подобны контрольным в обоих экспериментах, но в [5] (рис. 5, в, г) наблюдаются существенные отклонения по яркости. Очевидно, что реконструкция спектров, полученная в данной работе (рис. 5, а, б), заметно точнее чем в предыдущем исследовании (рис. 5, в, г).

В таблице 1 приведено сравнение результатов данной работы с предшествующими в отношении цветовых различий. Очевидно, что результаты данной работы во всех случаях точнее, за исключением проверочной реконструкции спектров

СCh из работы [8] (п. 3 в табл. 1), которая проводилась на базе калибровки по всем 24-м полям той же шкалы СCh.

Таблица 1. Сравнительная оценка цветовых различий между реконструированными и контрольными спектрами в работах [1, 5, 8].

№ п/п	Источник информации	Тип освещения	Калибровка (шкала/кол. полей)	Цветовое различие, ΔE_{ab}^*			
				Шкала СCh		Тестовая шкала (ТШ)	
				средн	макс	средн	макс
1	Данная работа	СИД	СCh / 6	2,26	5,59	3,01	9,60
2	Работа [5]	СИД	СCh / 24	7,51	41,69	—	—
3	Работа [8]	Ксеноновая вспышка	СCh / 24	1,39	2,69	6,99	17,30
			ТШ / 144	—	—	3,91	14,76
4	Работа [1]	СИД	СChDC/62*	2,34	5,6	—	—

* — стандартная цветовая шкала ColorCheckerDC (СChDC), содержит 240 полей.

Результаты данной работы, по сравнению с остальными, получены при существенно меньшем объёме калибровочного набора — шесть полей вместо нескольких десятков. Следует так же отметить наилучшую колориметрическую точность при обработке ТШ, являющуюся автотипным оттиском. Кроме того, приведённые значения цветовых различий практически совпадают с работой [1] (п. 4 в табл. 1).

Выводы

Проведённая модернизация оборудования и методики эксперимента несомненно дала положительный эффект. Калибровочный набор сокращён с нескольких десятков до шести полей стандартной шкалы, при этом точность получаемых результатов возросла.

Достигнутый уровень точности позволяет надеяться на получение решений, пригодных для промышленного применения. Это возможно при дальнейшем совершенствовании экспериментального оборудования и метода обработки данных.

Список литературы

1. Shrestha R., Hardeberg J. Y. An experimental study of fast multispectral imaging using LED illumination and an RGB camera // Color and Imaging Conference. Society for Imaging Science and Technology, 2015. Vol. 2015. P. 36–40.

2. High spatial resolution imaging colorimeter and gloss-meter for measurements of small parts / P. Boher [et al.] // Color and Imaging Conference. Society for Imaging Science and Technology, 2013. Vol. 2013. P. 96–101.
3. Hardeberg J. Y., Schmitt F., Brettel H. Multispectral image capture using a tunable filter // Proc. Spie. 2000. Vol. 3963. P. 77.
4. Imai F. H., Rosen M. R., Berns R. S. Comparison of Spectrally Narrow-Band Capture Versus Wide-Band with a Priori Sample Analysis for Spectral Reflectance Estimation // Color Imaging Conf. 2000. Vol. 2000, № 1. P. 234–241.
5. Мультиспектральная фотосъемка с использованием многоканального светодиодного кластера / С. Ю. Арапов [и др.] // Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях CAI-2016: сборник научных трудов по материалам I Международной конференции 5–6 мая 2016 г. Екатеринбург: Издательство УМЦ-УПИ, 2016. С. 7–10.
6. Арапова С. П., Арапов С. Ю., Мезенцева С. А. Управляемый мультиспектральный светодиодный кластер для репродукционных исследований // Информация: передача, обработка, восприятие: материалы международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 12–13 января 2016 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 104–111.
7. Арапов С. Ю., Арапова С. П., Тягунов А. Г. Экспериментальный комплекс мультиспектральной фотосъемки на основе стандартной цифровой камеры // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2014. № 5. С. 45–54.
8. Применение мультиспектральной фотосъемки для считывания шкал цветового контроля процесса печати / С. Ю. Арапов [и др.] // Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях CAI-2016: сборник научных трудов по материалам I Международной конференции 5–6 мая 2016 г. Екатеринбург: Издательство УМЦ-УПИ, 2016. С. 17–22.
9. Мультиспектральная фоторегистрация кларификационного эффекта при RGB-светодиодном освещении / С. Ю. Арапов [и др.] // Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях CAI-2016: сборник научных трудов по материалам I Международной конференции 5–6 мая 2016 г. Екатеринбург: Издательство УМЦ-УПИ, 2016. С. 11–16.
10. Оценка погрешности реконструкции спектров отражения тестовых полей по данным мультиспектральной фотосъемки / С. Ю. Арапов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2015. № 3. С. 68–77.